

FORMULACIÓN DE UN PROTOCOLO DE MODELACIÓN PARA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS POR MEDIO DE UN MODELO MATEMÁTICO, MODELO GAUSSIANO

FORMULATION OF A MODELING PROTOCOL FOR DISPERSION OF ATMOSPHERIC POLLUTANTS BY MEANS OF A MATHEMATICAL MODEL, GAUSSIAN MODEL

María Camila Acosta Santos
Ingeniera ambiental, Coordinadora de proyectos
Candidata Especialización en Planeación ambiental y manejo integral de los recursos naturales.
Bogotá, Colombia.
est.maria.acosta@unimilitar.edu.co

Artículo de Investigación

DIRECTOR
Ph.D. Ximena Lucía Pedraza Nájar

Doctora en Administración – Universidad de Celaya (México)
Magíster en Calidad y Gestión Integral – Universidad Santo Tomás e Icontec
Especialista en gestión de la producción, la calidad y la tecnología - Universidad Politécnica
de Madrid (España)
Especialista en gerencia de procesos, calidad e innovación – Universidad EAN (Bogotá D.C.)
Microbióloga Industrial – Pontificia Universidad Javeriana
Auditor de certificación: sistemas de gestión y de producto

Gestora Especialización en Gerencia de la Calidad - Universidad Militar Nueva Granada
ximena.pedraza@unimilitar.edu.co; gerencia.calidad@unimilitar.edu.co



La U
acreditada
para todos

**ESPECIALIZACIÓN EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO DE RECURSOS
NATURALES
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAYO DE 2021**

FORMULACIÓN DE UN PROTOCOLO DE MODELACIÓN PARA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS POR MEDIO DE UN MODELO MATEMÁTICO, MODELO GAUSSIANO

FORMULATION OF A MODELING PROTOCOL FOR DISPERSION OF ATMOSPHERIC POLLUTANTS BY MEANS OF A MATHEMATICAL MODEL, GAUSSIAN MODEL

María Camila Acosta Santos

Ingeniera ambiental, Coordinadora ambiental

Candidato Especialización en Planeación ambiental y manejo integral de los recursos naturales.

Bogotá, Colombia.

est.maria.acosta@unimilitar.edu.co

RESUMEN

La presentación de los informes de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos en Colombia tiene falencias y falta de investigación, por esta razón, se busca formular un protocolo de modelación de contaminantes atmosféricos basado en un modelo Gaussiano sencillo, entendible y al alcance de cualquier tipo de persona, académico, investigativo y/o profesional. Para la obtención de este modelo, se implementaron técnicas de investigación, recursos propios, experiencias de profesionales expertos en el campo y recopilación de algunos modelos elaborados con anterioridad por medio de las cuales se logró desarrollar un protocolo que puede ser utilizado con facilidad y ayude a facilitar los procesos de modelación en cualquier nivel de modelación.

Palabras clave: Modelo gaussiano, contaminación atmosférica, protocolo, calidad del aire.

ABSTRACT

The presentation of the reports of dispersion models of atmospheric pollutants in Colombia, has flaws and a lack of research, for this reason, it is sought to formulate an atmospheric pollutant modeling protocol based on an easy, understandable Gaussian model available for any type of person, academic, investigative and / or professional. To obtain this model, research techniques, own resources, experiences of professional experts in the field and a compilation of some previously elaborated models were implemented by means of which it was possible to develop a protocol that can be used easily and helps to facilitate modeling processes at any modeling level.

Keywords: . Gaussian model, atmospheric pollution, protocol. air quality.

INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS), en el 2014, redactó informes en donde establece que el 92% de la población mundial vive en lugares donde la contaminación ambiental está por encima de los estándares máximos permisibles de la normatividad ambiental legal vigente (Querol, 2018).

Colombia es considerado como un país megadiverso debido a su gran riqueza de especies vegetales y animales, lo que permite que ostente a nivel mundial “el primer lugar en especies de aves y orquídeas, el segundo con mayor riqueza de plantas, anfibios, mariposas y peces de agua dulce, además de la tercera posición en número de especies de palmas y reptiles, y el cuarto lugar en mamíferos” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

No obstante, Colombia, como el resto del mundo no está exenta a las problemáticas ambientales, de las cuales resaltan la gestión inadecuada de los recursos naturales, la homogenización del terreno por deforestación, la contaminación de suelos y la contaminación atmosférica, que se considera uno de los factores de mayor preocupación por los impactos generados en la salud de las personas y en el ambiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019), donde los principales contaminantes son el PM10 y PM2.5, además de los gases originarios de la combustión como óxidos de nitrógeno, azufre y carbono, y los compuestos orgánicos volátiles, entre otros.

Adicionalmente, se ha logrado evidenciar que una de las problemáticas más complicadas de manejar y gestionar es la contaminación atmosférica, debido, no solamente a su gran variedad de compuestos tóxicos, sino a la cantidad reacciones que originan estos en la atmosfera e incluso en los demás recursos naturales, esparciendo la contaminación y amplificándola. A partir de ello se puede establecer que la contaminación del aire es, por consiguiente, uno de los principales

modos en que se degrada y afecta el ambiente, donde casi, (Yassi *et al* (2002)), la describen como “la emisión al aire de sustancias peligrosas a una tasa que excede la capacidad de los procesos naturales de la atmósfera para transformarlos, precipitarlos y depositarlos o diluirlos por medio del viento y el movimiento del aire” (Yassi, Kjellström, de Kok, & Guidotti, 2002).

Actualmente, la preocupación de la ausencia de calidad del aire gira en torno al bienestar social, la salud pública y la disminución de enfermedades respiratorias, tales como el cáncer y las Enfermedades Respiratorias Agudas (ERAs), lo cual es totalmente razonable, ya que esta problemática afecta a todos los grupos socioeconómicos y edades (OMS, 2016). Sin embargo, la problemática relacionada a la ausencia de la calidad atmosférica y del aire posee un trasfondo importante en los procesos ambientales por lo que provoca entre otras cosas contaminación de los cuerpos hídricos y el suelo que posteriormente serán aprovechados por las especies vegetales, el ser humano y los animales.

Por una parte, los vientos afectados por la orografía y la variación de la presión generan que la atmosfera en la zona intertropical sea un punto óptimo para la difusión y circulación de los contaminantes desde las zonas industrializadas a las zonas no industrializadas y naturales, y que adicionalmente sea difícil identificar estas masas de aire con características térmicas diferentes (IDEAM & UNAL, 2018), por ende también la caracterización del tipo y la concentración de los contaminantes cuando estos circulan en la atmosfera.

Colombia y parte del trópico que poseen grandes superficies de costa oceánica se da lugar a perfiles eólicos que ayudan a dispersar los contaminantes, al igual que en los llanos orientales, que poseen una topografía relativamente nivelada se facilita la dispersión de los contaminantes por el viento a diversas zonas montañosas de la región y el país donde por efectos de choque limitan su circulación atrapándolos en valles, aumentando considerablemente su concentración.

Sumado a esto, conforme a Machado, et al., (2008) muchos de los contaminantes generados y emitidos a la atmosfera poseen elementos tales como material particulado, azufre, flúor y metales pesados, los cuales se pueden originar en las zonas industrializadas y ser transportados a áreas distantes a las fuentes de origen debido a su capacidad de asociación a masas de aire y por efectos de la recirculación de los vientos (Machado et al., 2008), generando necrosis en las especies vegetales, bioacumulación de contaminantes, alteraciones en el crecimiento e inhibición de los sistemas nervioso, inmunológico y endocrino cuando se dan altas exposiciones o bajas exposiciones en tiempos prolongados.

La mala o deficiente calidad del aire es un problema que no es puntual, sino que, se ve reflejada a nivel regional, por ende, se convierte en una problemática mundial. El aire al ser un fluido, no tiene límites geográficos y por acciones climatológicas, como los vientos, puede ser dispersado y desplazado; dentro de este desplazamiento no solo se mueven partículas vitales para el ambiente como el oxígeno y nitrógeno sino también se transportan contaminantes que pueden producir efectos dañinos no solo a las personas sino también a ecosistemas enteros (Pérez-Cardenas, 2017).

Un claro ejemplo de esto, es la intrusión de polvo del desierto del Sahara a otros continentes separados por océanos, según imágenes satelitales de la NASA, en junio de 2014 una corriente de vientos desde África causó afectaciones en la calidad del aire del territorio colombiano, observándose una alta elevación de Material Particulado en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Bogotá D.C (Mendez Espinosa et al., 2018). Las imágenes satelitales muestran que la nube de polvo pudo originarse en Mauritania, Senegal y el Sahara Occidental y desplazarse hasta el continente americano ocasionando efectos negativos a la calidad del aire (IDEAM, 2016).

Expuesto lo anterior, es aquí donde se empieza a ahondar en el comportamiento de los contaminantes que afectan la calidad del aire en la atmosfera. La manera en la que se mezclan los gases y contaminantes generados por fuentes de emisión con los gases (naturales) que se encuentran en la atmósfera se denomina dispersión de contaminantes, esta dispersión es dada por variaciones globales o locales según la topografía del lugar en donde se está presentando la afectación ambiental (Gonzalez Velandia, 2015). El comportamiento de estos niveles de concentración pueden representarse y calcularse a través de modelos matemáticos; gráficamente a partir de mapas de modelación ambientales a través de software especializados, y experimentalmente, con el uso de bancos de pruebas (Molano Guzmán & Díaz Álvarez, 2019). Dentro de los modelos matemáticos más utilizados se encuentra el modelo Gaussiano, esto se debe principalmente a su simplicidad de cálculo y facilidad de datos de entrada (Molano Guzmán & Díaz Álvarez, 2019). Sin embargo, es un tema poco estudiado en el contexto colombiano y se encuentra poca información acerca de su estandarización y practicidad a la hora de usarlo ya sea en proyectos, obras o actividades o a niveles regionales.

Por otra parte, el conocimiento e investigación en torno al comportamiento del desplazamiento de las concentraciones de contaminantes atmosféricos en el entorno en Colombia es bastante pobre, y afecta directamente a la gestión que se puede hacer frente al recurso para la reducción de la contaminación generada por una obra, proyecto y/o actividad.

Es por esto por lo que ha surgido la necesidad de generar herramientas que ayuden a la planificación y manejo de los recursos. Los modelos de simulación entran a jugar un papel importante en la toma de decisiones y los análisis multitemporales de los recursos naturales. Los modelos se construyen para conocer y/o predecir propiedades de un objeto real

El principal objetivo de este documento es formular un protocolo de modelación para la dispersión de contaminantes atmosféricos por medio de un método matemático conocido como Método Gaussiano, desarrollado a través del software de modelamiento AERMOD.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la formulación del protocolo de modelación para la dispersión de contaminantes atmosféricos se identificaron tres actividades necesarias, entre ellas se i) la descripción de fundamentos técnicos y teóricos de los modelos de dispersión, enfocados a la legislación Colombiana; ii) identificación de variables necesarias para la ejecución del modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos y finalmente iii) el desarrollo de elementos documentos que consoliden la información requerida para la ejecución del modelo.

i) Descripción de fundamentos técnicos y teóricos de los modelos de dispersión:

Para los fundamentos técnicos de los modelos de dispersión se ha realizado una revisión sistemática de la normatividad ambiental legal vigente, así como de los lineamientos, los términos de referencia y requerimientos para la presentación y elaboración de estudios ambientales en Colombia. La estrategia de búsqueda para la descripción de los fundamentos teóricos consistió en una revisión bibliográfica de los principales tópicos del protocolo, en donde se tuvo en cuenta bases de datos científicas como Redalyc, Science Direct, repositorios universitarios, esto con el fin de obtener artículos, libros, trabajos de grado de diferentes niveles, teniendo en cuenta una recopilación de los últimos 30 años de investigación.

La información se manejó a través de fichas bibliográficas para recolección de información a partir de filtros como títulos, palabras clave y resúmenes.

En la **Tabla 1** se muestra el formato utilizado para la recolección y filtro de la información utilizada dentro de la investigación. Con este formato se identificaron los artículos que podían contribuir al desarrollo del presente documento.

Tabla 1. Formato fichas bibliográficas de resumen.

No. Ficha bibliográfica	AREA	Ubicación	
1	Hace referencia al área de investigación a la que pertenece el documento	En donde se encuentra el documento	
Tema	Título	Autor	Editorial
El tópico principal del que trata el artículo	Nombre del documento	Autor	Nombre de la editorial
Resumen	Palabras clave		
Se encuentra el resumen del documento	Las 5 o 6 palabras clave		

Fuente: (Udem, 2017)

ii) **Identificación de variables necesarias para la ejecución del modelo de dispersión**

Para la identificación de las variables a utilizar para la ejecución del modelo de dispersión, se utilizó la información descrita en los fundamentos técnicos y teóricos de los modelos de dispersión.

En este apartado se investigaron y analizaron diferentes posibles software utilizados para la modelación de dispersión de contaminantes, teniendo en cuenta que dentro de su fundamento tuviesen en cuenta el modelo Gaussiano,

Como metodología principal de esta actividad, se realizó la revisión de la documentación y guías de usuario del Software de modelación encontradas en las páginas principales de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés). También, se tomó como referencia la documentación realizada por algunos procedimientos realizados por consultoras y empresas ambientales que se dedicaran a realizar este tipo de modelos.

Finalmente, se realizaron entrevistas y se entablaron diálogos con algunos profesionales expertos en esta área para llegar a una conclusión de cuáles eran las variables utilizadas para la modelación con el software.

iii) Desarrollo de elementos documentales que consoliden la información requerida para la ejecución del modelo

Con base en la información de las anteriores fases se desarrollaron diferentes elementos documentales para consolidar la información requerida para la ejecución del modelo a partir de hojas de cálculo del Software Ofimático Excel del paquete Microsoft 365.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

i) Fundamentos técnicos de los modelos de dispersión en Colombia

Dentro de la revisión se encontró que el principal oferente para el desarrollo de los modelos de dispersión en Colombia es el documento *“Metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales”* desarrollado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales de Colombia (ANLA) en el año 2018. Este documento constituye un conjunto de instrucciones ordenadas y jerarquizadas que facilitan a quien está interesado en desarrollar un proyecto, obra o actividad sujeto de licenciamiento ambiental, el proceso de elaboración y presentación de los estudios ambientales que exige la normativa colombiana; estas instrucciones aseguran que los estudios ambientales contengan la información suficiente y necesaria para que las autoridades ambientales tomen decisiones frente al desarrollo de los proyectos (ANLA, 2018).

La organización de la metodología presenta tres capítulos principales el primero es un Capítulo General, esto quiere decir que aplica para cualquier estudio ambiental y menciona los lineamientos generales para su elaboración, el segundo establece las especificaciones técnicas

para elaborar el Diagnóstico Ambiental de Alternativas y finalmente en el capítulo tercero establece las especificaciones técnicas para elaborar el Estudio de Impacto Ambiental y el Plan de Manejo Ambiental de una obra, proyecto y actividad (ANLA, 2018).

El componente atmosférico se encuentra presente tanto en el capítulo para la elaboración del Diagnóstico Ambiental de Alternativas, específicamente en la caracterización del área de estudio; como en el capítulo especificaciones técnicas para elaborar el Estudio de Impacto Ambiental y el Plan de Manejo ambiental en el numeral de área de influencia, caracterización del área de influencia y en el numeral denominado Demanda, Uso, Aprovechamiento y/o Afectación de Recursos Naturales específicamente en el apartado de permiso de emisión atmosférica.

Tabla 2. Descripción del contenido de modelación de los capítulos de la metodología de la ANLA, 2018.

Capítulo	Numeral	Componente	Contenido	Descripción
Diagnostico ambiental de alternativas	Caracterización del área de estudio	Atmosférico	Meteorología Identificación de fuentes de emisión Modelación de escenarios y calidad del aire	Para el caso específico de la modelación de escenarios describe lo siguiente: <i>“se debe realizar la modelización de la dispersión de los contaminantes en el área de estudio para cada una de las alternativas presentadas, incluyendo los receptores de contaminación identificados. Esta simulación tiene por objetivo la construcción de escenarios que permitan la identificación de elementos diferenciales y comparación preliminar de cada una de las alternativas, a fin de suministrar a la autoridad ambiental competente elementos de juicio para la selección de alternativas. Se debe presentar un informe de evaluación de tres escenarios, comparándolos y analizando los resultados obtenidos, con énfasis en los posibles impactos que puedan esperarse para los receptores. Si existe información secundaria del Subsistema de Información sobre la Calidad de Aire – SISAI (administrado por el IDEAM), monitoreos de campañas de calidad del aire de Metodología General para la Elaboración y Presentación de Estudios Ambientales 68 conocimiento público de laboratorios acreditados por el IDEAM o información de inmisión por</i>

Capítulo	Numeral	Componente	Contenido	Descripción
Especificaciones técnicas del estudio de impacto ambiental y del plan de manejo ambiental				<i>modelación de entidades de reconocida idoneidad científica nacional o internacional, se debe identificar el estado de la calidad del aire en concentración para gases y material particulado, sobre los receptores identificados para cada alternativa del proyecto. Se debe allegar la georreferenciación de los puntos de levantamiento de información de los parámetros identificados.”</i>
	Área de influencia	Medio abiótico		<i>“Algunos ejemplos de modelaciones numéricas que se pueden presentar en el medio abiótico son el modelamiento de dispersión de las emisiones generadas por las fuentes asociadas al proyecto y el modelamiento de los niveles de ruido ambiental para el componente atmosférico”</i>
	Caracterización del área de influencia	Medio abiótico / atmosférico	Inventario de fuentes de emisiones atmosféricas Calidad del aire Meteorología Ruido	<i>“Con el objetivo de determinar los posibles impactos en la calidad del aire en el área de influencia del proyecto, obra o actividad, se requiere una línea base que sirva de referencia para evaluar la evolución a través del tiempo del componente atmosférico.”</i>
	Demanda, uso, aprovechamiento y/o afectación de recursos naturales	Permiso de emisión atmosférica (aire y ruido)	Emisión de contaminantes del aire Modelo de dispersión Fuentes de generación de ruido	<i>“Realizar un inventario de emisiones atmosféricas de fuentes asociadas al proyecto y una modelación de dispersión de contaminantes, para tres escenarios posibles (actual sin proyecto, futuro con proyecto sin medidas de control y futuro con proyecto con medidas de control) cuando se requiera permiso de emisiones atmosféricas asociados al proyecto. Cuando no se requieran permisos de emisiones, únicamente se debe presentar el inventario de emisiones de las fuentes del proyecto.”</i>

Fuente: elaboración propia a partir de (ANLA, 2018), 2021.

Según el último enunciado de la **Tabla 2** el capítulo de demanda, uso, aprovechamiento y/o afectación de recursos naturales para el permiso de emisión atmosférica se debe realizar una modelación de dispersión de contaminantes de la cual hace la siguiente descripción técnica:

La modelación de contaminantes debe seguir los siguientes lineamientos y adicionalmente, aquellos que sean solicitados en la Guía de Modelación de Contaminantes Atmosféricos, la cual será proyectada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Tabla 3. Estructura y contenido del informe de resultados de la modelación de dispersión.

Sección	Contenido
Objetivo de la modelación/ simulación	Descripción del problema a representar y las preguntas a responder
Modelo conceptual	<ul style="list-style-type: none"> • Características de las fuentes: número, tipo, ubicación, geometría, altura entre otras. • Características de la emisión: contaminantes emitidos, tasas de emisión, factores de emisión, temperaturas, velocidades, entre otras. • Condiciones iniciales y de frontera: concentración de fondo, topografía, usos del suelo, coberturas, información meteorológica inicial (sondeos, superficie, salida de modelos meso escala).
Descripción del modelo	<ul style="list-style-type: none"> • Características del modelo: ecuaciones que lo gobiernan, métodos de solución, simplificaciones y limitaciones, entre otras. • Relaciones entre el modelo conceptual y el modelo utilizado: uso de la información, congruencia en las simplificaciones, referencias de usos anteriores
Calibración	<ul style="list-style-type: none"> • Lista de parámetros a calibrar; variables respuesta asociadas al parámetro, análisis de sensibilidad al parámetro, entre otras. • Estrategia de calibración: minimización de indicadores de error y sesgo, maximización de indicadores de bondad de ajuste, entre otras. • Criterio de calibración y resultado de la prueba: descripción de estadísticos, límites de aceptación, referencias relevantes, tabla de evaluación.
Validación	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción de los escenarios de validación; diferencias con el escenario calibrado, cambios en el modelo conceptual. • Criterios de validación y resultado de la prueba: descripción de estadísticos, límites de aceptación, referencia relevantes, tabla de evaluación.
Escenarios	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción de los escenarios: propósito del escenario, modificaciones requeridas sobre el modelo base. • Evaluación de los escenarios: congruencia de los resultados, evaluación normativa, análisis del resultado en virtud del propósito • Contraste de escenarios: congruencia selección de alternativas
Análisis de resultados	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de sensibilidad de los resultados,

Sección	Contenido
	calibración y validación
	<ul style="list-style-type: none"> • Valores simulados (presentados en tablas), estadísticos, gráficos, mapas. • Análisis de las concentraciones simuladas en términos de la normativa aplicable
Conclusiones y recomendaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Deben ser congruentes con el objetivo y las preguntas
Referencias	Referencias a trabajos citados
Anexos electrónicos	Archivos de entrada y salida, archivos de control y demás información necesaria para reproducir resultados.

Fuente: (ANLA, 2018).

En la **Tabla 3** se ve representado el contenido que debe tener el informe de la modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos para la presentación de estudios ambientales ante las diferentes autoridades ambientales, a pesar de tener una estructura con términos precisos deja abierta la posibilidad de ser interpretada de diferentes maneras y no contempla una metodología para su elaboración, esto quiere decir que puede hacerse con diversas metodología y en algunas ocasiones puede presentarse para malinterpretación de la norma. Esto quiere decir que, para este ejercicio, se mantuvo esta estructura a partir del software de modelación atmosférica AERMOD.

ii) Fundamentos teóricos de los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos (modelo Gaussiano)

El modelo de dispersión Gaussiano calcula niveles de inmisión en un punto del espacio de coordenadas (x,y,z) donde el origen del sistema de coordenadas se fija en la base de la fuente de emisión del contaminante (Manzur et al., 2013). La ecuación general del modelo de Gauss para determinar la concentración de un contaminantes en un punto es:

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi u \sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+h}{\sigma_z} \right)^2 \right] \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-h}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad \text{Ecuación 1}$$

El modelo matemático mencionado ha sido sometido a diversos cambios en su estructura, pues a lo largo del tiempo se han encontrado ciertas falencias a las que poco a poco se las ha ido dando solución, tal es el caso del Modelo de Pasquill, el cual ha sido el más aceptado por la

comunidad científica, este propone un cambio de variable, dando a conocer unos coeficientes de dispersión σ_y y σ_z (Hernández Garces et al., 2015).

$$C_{x,y,z} = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z+h)^2}{\sigma_z^2}\right) \quad \text{Ecuación 2}$$

Al realizar predicciones de concentraciones a nivel del suelo, se identificó que no se generaba una predicción correcta, por ello, se propuso la teoría de las imágenes, en donde se supone una zona imaginaria de reflexión, sumándose así la concentración predicha con la concentración de la zona de reflexión (Manzur et al., 2013):

$$C(y,z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde,

x,y,z: coordenadas espaciales en metros (m)

C(x,y,z): concentración de contaminante en un punto (x,y,z) en g/m³

Q: caudal de emisión en g/s

σ_y y σ_z : desviación estándar en las direcciones “y” y “z” respectivamente en metros (m)

u: velocidad media del viento en (m/s) en el sentido del eje x

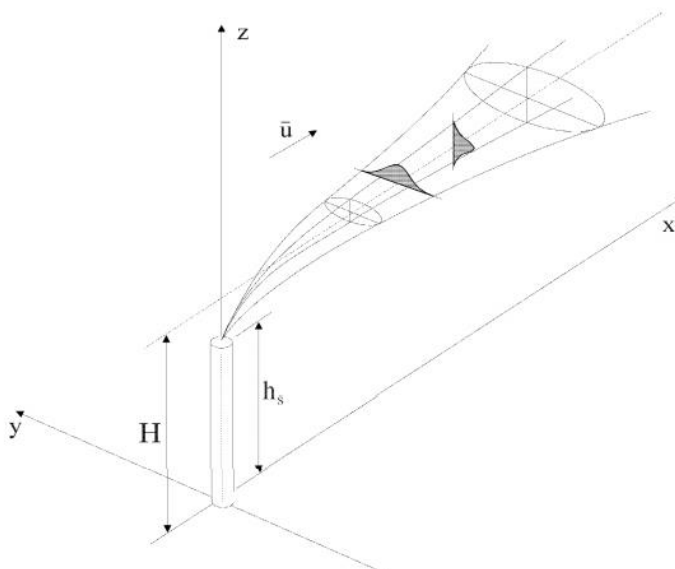
h: altura efectiva de emisión (m)

La pluma gaussiana (ver

Figura 1) se desplaza en el plano horizontal (x), acorde a la dirección predominante del viento, y se dispersa perpendicularmente a su desplazamiento, debido a la turbulencia de la atmosfera (Galván 2012). La formulación matemática del modelo se obtiene a partir de la ecuación de difusión (ecuación 3). Considerando que la información de flujo másico y velocidad del viento son datos de entrada del modelo, el esfuerzo matemático del modelo se concentra en determinar los coeficientes de dispersión y la horizontal (Z) para determinar la concentración de

contaminantes en un punto e instante dado, según la capacidad de dispersión de la atmosfera, que es una función de la turbulencia atmosférica (Puigserver y Carrascal, 2008).

Figura 1. Esquema de la pluma gaussiano. H , altura media de transporte, h_s altura de emisión y u es la velocidad del viento.



Fuente: (Hernández Garces et al., 2015)

iii) Identificación de variables necesarias para la ejecución del modelo de dispersión

El modelo AERMOD EPA USA, consiste en determinar la distribución de contaminantes en una pluma de manera horizontal y vertical siguiendo un comportamiento normal (ver **Figura 1**), esto quiere decir que el modelo AERMOD tiene sus fundamentos en la distribución de GAUSS. Este modelo incorpora algoritmos de dispersión para considerar las diferencias de cotas del terrenos en el dominio (Silva & Arcos, 2011).

Para la identificación de las variables se utilizó el documento “*User’s Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD)*”(EPA, 2019) y conclusiones a las que se llegó con algunas

expertos en modelación. A continuación, se encuentra la parametrización y variables de entrada la ejecutar la modelación.

Tabla 4. Parámetros para el modelo AERMOD

Tipo de parametrización	Parámetros	Obtención de información
Meteorológica	Velocidad del viento	Estación virtual; algoritmo de simulación meteorológica Wather Research and Forecasting (WRF).
	Dirección del viento	
	Temperatura ambiente	
	Cobertura de nubes	
	Observación de radiación	
	Rugosidad superficial	
	Rata de Bowen (Humedad disponible para evaporación)	
	Albedo (medida de cuanta radiación solar es deflectada)	
PBL	Velocidad de fricción	
	Longitud Monin – Obukhov	
	Escala de velocidad convectiva	
	Escala de temperatura	
	Altura de mezcla	
	Flujo de calor en la superficie	
	Perfiles verticales de viento	
	Fluctuaciones turbulentas laterales y verticales	
	Gradiente potencial de temperatura	
Variables físicas	Localización de la fuente a través de su ubicación espacial (coordenadas x,y)	Información recolectada en campo a partir de inventarios de emisión de contaminantes atmosféricos
	Alturas sobre el nivel del mar de la base de la fuente	
	Altura de la fuente sobre el nivel del terreno	
	Velocidad de salida de salida del contaminante	
	Caracterización geométricas de cada fuente (altura, diámetro de descarga, temperatura de salida, ancho de banda)	
Variables químicas	Emisión (factor de emisión) g/s	Cálculo a partir de factores de emisión

Como se evidencia en la **Tabla 4** los parámetros se dividen principalmente en cuatro, los meteorológicos, los PBL, las variables físicas y las químicas. Para la primera y segunda parametrización, se utiliza algoritmo de simulación meteorológica Wather Research and Forecasting (WRF), estos son procesados y validados a través del software AERMET y AERMAP los cuales son una variante del modelo AERMOD y funcionan en simultaneo (EPA, 2019). Las variables físicas se establecen a partir de la recolección de información en campo por medio de los inventarios de emisión de contaminantes atmosféricos del área de influencia del proyecto, obra o actividad que se está estudiando.

Finalmente, las variables químicas, o la emisión se determina a partir de los factores de emisión, los cuales pueden ser calculados por diferentes metodologías establecidas mundialmente según el tipo de fuente de emisión a la que se hará el cálculo como lo son los AP-42: Compilation of Air Emission Factors de la EPA (US EPA, 1995) o la guía EMEP/EEA Air Pollutant emission inventory guidebook 2019 o en español, la guía de inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de EMEP CORINAIR (EEA, 2019). Toda esta parametrización estará incluida dentro del modelo, por medio de una codificación, la cual esta descrita en su manual de usuario.

iv) Desarrollo de elementos documentales que consoliden la información requerida para la ejecución del modelo

Una vez analizado el contexto matemático del modelo, se desarrolló la propuesta metodológica para la construcción de un modelo de dispersión a partir de los lineamientos descritos anteriormente.

a) Inventario de emisiones

Según el Subsistema de Información sobre calidad del aire SISAIRE del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM un inventario de emisiones

atmosféricas es un conjunto de datos que caracterizan y consolidan, mediante sumatoria, las emisiones de contaminantes atmosféricos, de acuerdo con el tipo de fuente y el tipo y cantidad de contaminantes emitidos en un área geográfica y en un intervalo de tiempo determinado (Gaitán & Cárdenas, 2017).

$$IEA = \sum_{i=1}^n E_{j,t} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

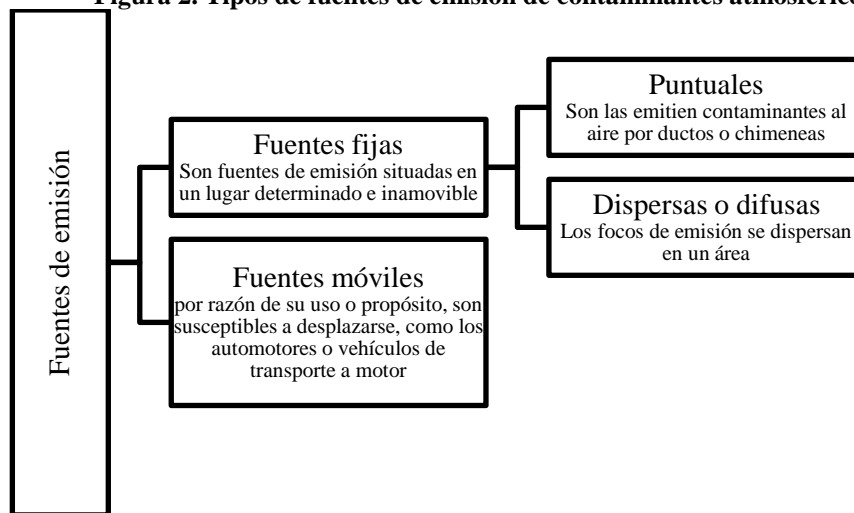
IEA: Inventario de emisiones atmosféricas para la sustancia o mezcla de sustancias (j) en el periodo de tiempo (t)

$E_{j,t}$: emisión atmosférica de la sustancia o mezcla de sustancias (j), generada por la actividad (i) en el periodo de tiempo (t).

n : número total de actividades a inventariar.

Para este ejercicio la clasificación de las fuentes de emisión se realizó según la tipología de la fuente, las cuales se agrupan en fuentes fijas las cuales a su vez se dividen en puntuales y dispersas o difusas y finalmente las fuentes móviles.

Figura 2. Tipos de fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos.



Fuente: elaboración propia apartir de (Gaitán & Cárdenas, 2017).

Dados los lineamientos descritos anteriormente de la parametrización necesaria para la ejecución de la modelación se realizaron formatos de recolección de información en campo para facilidades de modelación y reducción de errores por falta de información. La **Figura 3** y **Figura 4** se pueden observar los formatos de campo para recolección de fuentes fijas tanto para las puntuales como para las dispersas respectivamente.

Figura 3 Formato recolección en campo para fuentes fijas

Formato - Inventario de Emisiones Atmosféricas - Fuentes Fijas														Versión: 1			
														Vigencia: 2020-11-17			
														Código:			
Nombre del Proyecto:														Página ____ de ____			
Fecha:														Profesional:			
ID	Nombre de la fuente	Tipo de combustible	Consumo de combustible (hora)	Horas de trabajo por día	Días de trabajo al año	Dímetro de descarga	Altura de descarga	Sistema de control y % de eficiencia	Temperatura de salida del gas (°K)	Velocidad de salida del gas (m/s)	Año de inicio de operación del equipo	Marca del equipo	Cota	Coordenadas		Observaciones	# de Fotografía
														NORTE	ESTE		

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 4. Formato de recolección en campo para fuentes dispersas.

Formato - Inventario de Emisiones Atmosféricas - Fuentes Dispersas														Versión: 1									
														Vigencia: 2020-11-17									
														Código:									
Nombre del Proyecto:														Página ____ de ____									
Fecha:														Profesional:									
ID	Nombre de la fuente	Área de la fuente	Altura de ruta de carga y descarga	Horas de trabajo por día	Días de trabajo al año	Sistema de control y % de eficiencia	Cota	Coordenadas Inicio		Coordenadas		Coordenadas		Coordenadas		Coordenadas		Observaciones	# de Fotografía				
														NORTE	ESTE	NORTE	ESTE			NORTE	ESTE	NORTE	ESTE

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En lo que respecta a las fuentes móviles, se debe realizar en estudio e informe de tráfico vehicular de las vías que serán utilizadas por el proyecto, obra o actividad. Ya existen metodologías para la recolección de este tipo de información en campo. A partir de estos estudios se obtiene información como la cantidad de vehículos diarios que pasa por una vía, la longitud de la vía, características de la vía y de los vehículos que transitan por ella.

b) Cálculo de emisiones atmosféricas

Dentro de los inventarios de emisiones se encuentran los cálculos de emisiones atmosféricas. Existen diferentes formas de calcular las emisiones atmosféricas emitidas por una fuente, la más precisa es la medición directa de la fuente (Gaitán & Cárdenas, 2017) a partir de monitoreos de calidad de aire por medio de muestreos isocinéticos, sin embargo, existen escenarios en los que, para la presentación de estudios de impacto ambiental o diagnósticos de alternativas, aún no existen fuentes de emisión por lo cual se realizan escenarios proyectados. Para esta proyección se utilizan otro tipo métodos como factores de emisión. Se recomienda utilizar el método factores de emisión de la AP-42: Compilation of Air Emission Factors de la EPA (US EPA, 1995) y la guía EMEP/EEA Air Pollutant emission inventory guidebook 2019 o en español, la guía de inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de EMEP CORINAIR (EEA, 2019). El Modelo internacional de emisiones vehiculares (IVE) permite estimar emisiones vehiculares a nivel proyecto y a escala regional y nacional, se pueden modelar diferentes tipos de contaminantes (Gaitán & Cárdenas, 2017).

c) Construcción de código en hojas de cálculo ventana de Excel

Para ayudar a la ejecución del modelo y facilitar el proceso de parametrización se construyeron hojas de cálculo en las que se incluyen las variables y parámetros (datos de entrada) requeridos por el modelo AERMOD los cuales están compuestos principalmente por una grilla de receptores, o malla de receptores, la localización de las fuentes de emisión y el tipo de fuente de emisión a modelar, la parametrización de las características de la fuente de emisión (EPA, 2019).

- Malla de receptores (grilla de receptores)

Esta es compuesta principalmente por los puntos con coordenadas (x,y) a las cuales se les calculará la simulación del modelo, esta malla se diseñará de acuerdo a las características (área)

PROTOCOLO DE MODELACIÓN PARA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

de la zona de estudio, y se tendrá que hacer una análisis de la cantidad adecuada para realizar la modelación según el área del proyecto. La codificación e interpretación de este elemento esta descrita como “RE DISCCART” dentro de la modelación. En la **Figura 5** se puede evidenciar la estructura de la hoja de cálculo para la malla de receptores.

Figura 5 Interfaz Excel de la codificación para la malla de receptores.

G6		=CONCATENAR(A6;" ";B6;" ";C6;" ";D6;" ";E6)																					
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	En esta hoja se realizará la parametrización de la georreferenciación de los receptores de interés, para alimentar el modelo de dispersión.																						
2	En las columnas de la izquierda se introduce la codificación RE DISCCART, diferenciando los receptores establecidos en la grilla de los receptores discretos, seguido de las coordenadas norte y este, y la cota. En la columna se muestran los datos introducidos de forma cocalenada, con lo cual se alimenta el modelo.																						
3																							
4																							
5	**Receptores (Grilla)						**Receptores (Grilla)																
6	CODIFICACIÓN	COORD_NORTE	COORD_ESTE	ALTURA (DEM)			CODIFICACIÓN	COORD_NORTE	COORD_ESTE	ALTURA (DEM)													
7	RE DISCCART	960523.4613	1053420.36	127			RE DISCCART	960523.4613	1053420.3629	127													
8	RE DISCCART	961023.4613	1053420.36	130			RE DISCCART	961023.4613	1053420.3629	130													
9	RE DISCCART	961523.4613	1053420.36	136			RE DISCCART	961523.4613	1053420.3629	136													
10	RE DISCCART	962023.4613	1053420.36	140			RE DISCCART	962023.4613	1053420.3629	140													
11	RE DISCCART	962523.4613	1053420.36	131			RE DISCCART	962523.4613	1053420.3629	131													

Fuente: elaboración propia, 2021.

- Localización de las fuentes de emisión:

Para la localización de las fuentes de emisión se debe tener en cuenta la codificación “SO LOCATION” dentro del modelo, el identificador (ID) y las coordenadas de la ubicación de la fuente (X,Y) como se puede observar en la según el tipo de fuente de emisión que se va a modelar, para este ejemplo, fuentes de emisión fijas;

Figura 6 Interfaz Excel de la codificación para la localización de fuentes fijas.

SUMA		=CONCATENAR(A6;" ";B6;" ";C6;" ";D6;" ";E6;" ";F6)																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		
1	En esta hoja se realizará la parametrización para modelar PM10, según el tipo de fuente que lo emita.																		
2	En las columnas de la izquierda se introduce la codificación 'SO LOCATION' por cada fuente, seguido de su nombre, tipo de entidad, sus coordenadas este y norte, y finalmente la altura; luego se introduce la co																		
3	seguido del mismo nombre de la fuente, el resultado del cálculo de emisión, la altura de descarga, temperatura de salida (°K), velocidad de salida y diámetro de descarga. En la columna de la derecha, se mues																		
4	de forma cocalenada, con lo cual se alimenta el modelo.																		
5	**Emisión Fuentes Fijas**									**Emisión Fuentes Fijas**									
6	CODIFICACIÓN	ID_FUENTE	TIP_ENTIDAD	COORD_ESTE	COORD_NORTE	ALTURA	=CONCATENAR(A6;" ";B6;" ";C6;" ";D6;" ";E6;" ";F6)												
7	SO LOCATION	GEN01	POINT	973080.404	1045161.713	135	SO LOCATION GEN01 POINT 973080 404019 1045161.71253 135												
8	SO LOCATION	GEN02	POINT	973089.1353	1045159.331	135	SO LOCATION GEN02 POINT 973089 135287 1045159.33128 135												
9	SO LOCATION	GEN03	POINT	973097.0728	1045156.156	135	SO LOCATION GEN03 POINT 973097 072803 1045156.15627 135												
10	SO LOCATION	GEN04	POINT	970914.5572	1043169.898	133	SO LOCATION GEN04 POINT 970914.55721 1043169.89844 133												
11	SO LOCATION	GEN05	POINT	970920.9072	1043162.755	134	SO LOCATION GEN05 POINT 970920 907222 1043162 75468 134												

Fuente: elaboración propia, 2021.

- Emisión:

Para este ejercicio, la última parte se llamará emisión; esta consiste en la codificación de los parámetros físicos y químicos y/o características de la fuente de emisión. Esta dependerá del

tipo de fuente que se está manejando y también se realiza según el contaminante que se está modelando. Cabe aclarar que este procedimiento se debe hacer por cada contaminante a evaluar.

La codificación está compuesta de la siguiente manera: El código identificador de emisión “SO SRCPARAM” el identificador (ID) la emisión (g/s), la altura de descarga (m), la temperatura de salida (en grados kelvin) la velocidad de salida en (m/s) y el diámetro de descarga (m) para el caso de chimeneas, cabe aclarar que esa parametrización puede variar según el tipo de emisión.

Figura 7 Interfaz Excel de la codificación para emisión de fuentes fijas.

SUMA		X ✓ fx		=CONCATENAR(A22;" ";B22;" ";C22;" ";D22;" ";E22;" ";F22;" ";G22;" ";H22)															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	En esta hoja se realizará la parametrización para modelar PM10, según el tipo de fuente que lo emita.																		
2	En las columnas de la izquierda se introduce la codificación 'SO LOCATION' por cada fuente, seguido de su nombre, tipo de entidad, sus coordenadas este y norte, y finalmente la altura; luego se introduce la codificación 'SO SRCPARAM', seguido del mismo nombre de la fuente, el resultado del cálculo de emisión, la altura de descarga, temperatura de salida (°K), velocidad de salida y diámetro de descarga. En la columna de la derecha, se muestran los datos introducidos de forma concatenada, con lo cual se alimenta el modelo.																		
3																			
20	SO	SRCPARAM	ID Fuente	EMISIÓN	hdescarga	tsalida k	vsalida	diamedescar											
21																			
22	SO	SRCPARAM	GEN01	0.042314254	3.5	523	14	0.1524	=CONCATENAR(A22;" ";B22;" ";C22;" ";D22;" ";E22;" ";F22;" ";G22;" ";H22)										
23	SO	SRCPARAM	GEN02	0.042314254	3.5	523	14	0.1524	SO SRCPARAM GEN02 0.0423142537037037 3.5 523 14 0.1524										
24	SO	SRCPARAM	GEN03	0.042314254	3.5	523	14	0.1524	SO SRCPARAM GEN03 0.0423142537037037 3.5 523 14 0.1524										
25	SO	SRCPARAM	GEN04	0.042314254	3.5	523	14	0.1524	SO SRCPARAM GEN04 0.0423142537037037 3.5 523 14 0.1524										
26	SO	SRCPARAM	GEN05	0.042314254	3.5	523	14	0.1524	SO SRCPARAM GEN05 0.0423142537037037 3.5 523 14 0.1524										

Fuente: elaboración propia, 2021.

d) Codificación del software modelador

Finalmente, después de haber realizado la codificación en las hojas de cálculo en Excel, estas se colocan dentro del archivo INP o de entrada del modelo AERMOD junto con los INPUT de AERMET y AERMAP y se procede a ejecutar la modelación.

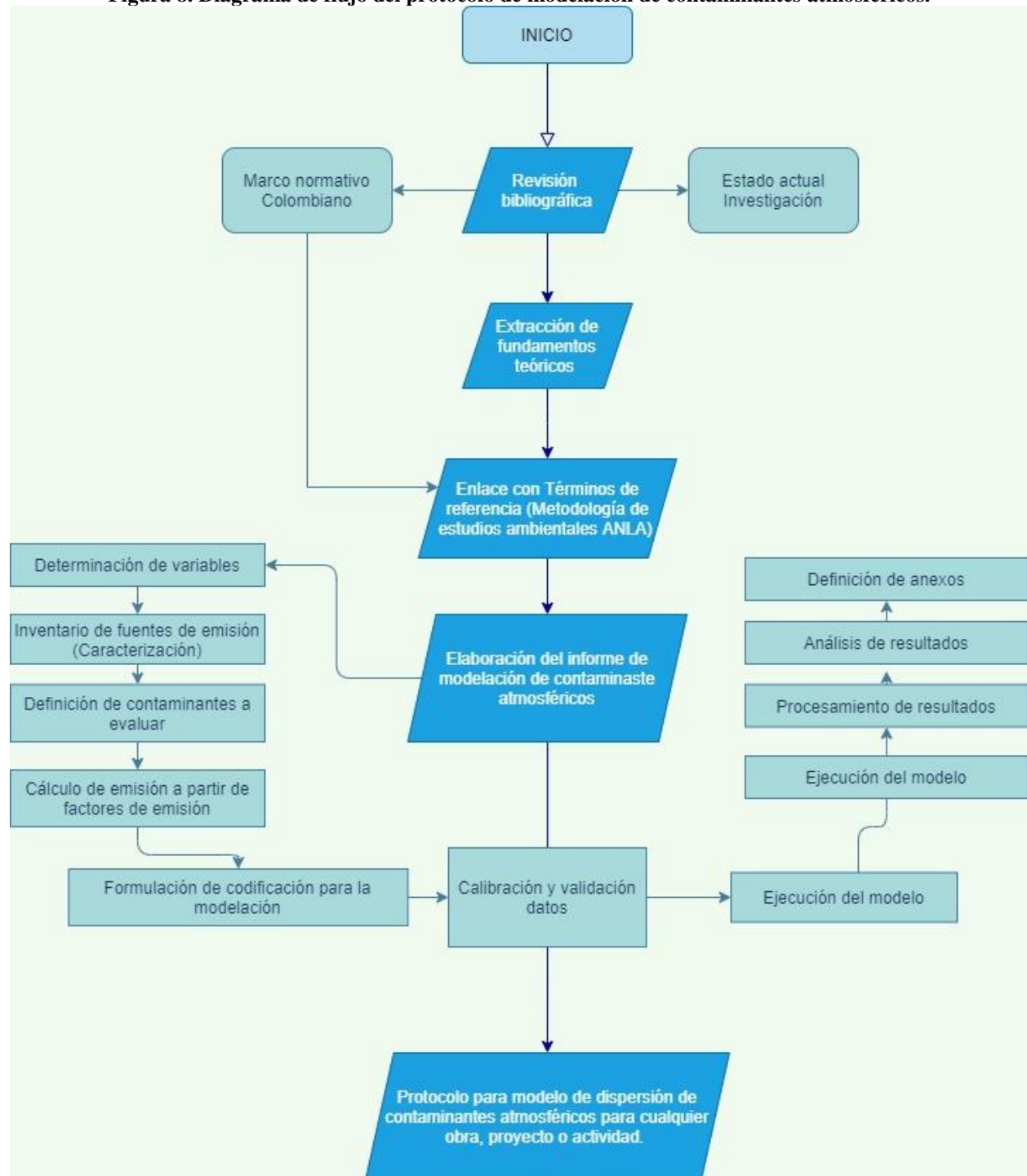
Posterior a la ejecución del modelo se realizan procesos de validación de datos con concentraciones de fondo, esta validación consiste en realizar una comparación de los resultados de la modelación con estaciones de calidad del aire que se encuentren alrededor y dentro del área del proyecto en caso de contarse con ellas, para verificar que los resultados sean confiables y coherentes.

En la figura se muestra el diagrama de flujo del protocolo de modelación (método Gaussiano) para un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos, que puede ser utilizado

PROTOCOLO DE MODELACIÓN PARA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

para la entrega de modelaciones a las autoridades ambientales y/o estudios académicos y de investigación.

Figura 8. Diagrama de flujo del protocolo de modelación de contaminantes atmosféricos.



Fuente: elaboración propia, 2021.

CONCLUSIONES

La metodología para la elaboración de estudios ambientales realizada en el año 2018 por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible y algunos artículos de investigación son herramientas fundamentales para describir los fundamentos técnicos y teóricos de los modelos de dispersión basados en métodos matemáticos, gracias a las fichas bibliográficas se logró identificar la importancia de cada uno de ellos en la elaboración de la documentación e informes ambientales.

A pesar de que los fundamentos técnicos establecidos por la normatividad ambiental legal vigente y autoridades ambientales tienen una estructura en términos precisos deja abierta la posibilidad de ser interpretada de diferentes maneras y no contempla una metodología para su elaboración, esto quiere decir que puede hacerse con diversas metodologías.

Las hojas de cálculo son herramientas que ayudan a facilitar el proceso de modelación, con la codificación y estructuración de los parámetros a modelar, este proceso reduce los tiempos empleados para realizar la ejecución del modelo de dispersión.

El software AERMOD, es un modelo de fácil acceso y baja complejidad, eficaz que ayuda a elaboración de modelos de dispersión entendibles y dinámicos que pueden utilizarse tanto en investigación como en casos de la vida real.

La creación de metodología para la modelación de contaminantes atmosféricos en un país como Colombia, por su falta de investigación, son estrategias que ayudan a mitigar la brecha de conocimiento e investigación en torno a la modelación ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANLA. (2018). *METODOLOGÍA GENERAL PARA LA ELABORACIÓN Y PRESENTACIÓN DE ESTUDIOS AMBIENTALES*. 1–26.
- EEA. (2019). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013: Technical guidance to prepare national emission inventories. *EEA Technical Report, 12/2013, 23*.
<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>
- EPA, U. . (2019). *User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD)*. 68–70.
- Gaitán, M., & Cárdenas, P. A. (2017). *Guía para la elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas*.
http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf
- Gonzalez Velandia, T. F. (2015). *DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA UNIVERSIDAD LIBRE POPULAR., SECCIONAL BOGOTÁ SEDE BOSQUE*. 2015.
<http://weekly.cnbnews.com/news/article.html?no=124000>
- Hernández Garces, A., Jauregui Haza, U., Souto González, J. A., Casares Long, J. J., Saavedra Rodríguez, S., Guzmán Martínez, F., & Torres Valle, A. (2015). Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones. *UCE Ciencia. Revista de Postgrado*, 3(2), 1–17. file:///C:/Users/iphon/AppData/Local/Temp/49-184-1-PB.pdf
- IDEAM. (2016). Segundo Boletín contaminación atmosférica, Colombia 2016. *Publicación Aprobada Por El Comité de Comunicaciones y Publicaciones Del IDEAM*, 2.
- Manzur, M. E., Benzal, M. G., & Gonzalez, S. N. (2013). *Simulación de dispersión de contaminantes atmosféricos*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (21 de mayo de 2019). Colombia, el segundo país más biodiverso del mundo, celebra el Día Mundial de la Biodiversidad. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). Estrategia Nacional de Calidad del Aire. Bogotá D.C

Mendez Espinosa, J., Herrera, L., & Belalcazar, L. (2018). Study of a Saharan Dust Intrusion into the Colombian Atmosphere/ Estudio de una intrusión de polvo sahariano en la atmósfera de Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17, 17–34. <https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a1>

Molano Guzmán, L. G., & Díaz Álvarez, C. J. (2019). *Análisis y verificación del modelo Gaussiano de dispersión: Métodos Teóricos y experimentales*. Fundación Universidad de América, Revista de investigación.

Pérez-Cardenas, J. E. (2017). La calidad del aire en colombia: un problema de salud pública, un problema de todos. *Biosalud*, 16(2), 5–6. <https://doi.org/10.17151/biosa.2017.16.2.1>

Querol, X. (2018). *Calidad Del Aire Reto Mundial*.

Silva, A., & Arcos, D. (2011). Aplicación del programa AERMOD para modelar dispersión de PM10 emitido por equipos de calefacción a leña en la ciudad de Constitución. *Obras y Proyectos*, 9, 4–10. <https://doi.org/10.4067/s0718-28132011000100001>

US EPA. (1995). AP 42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary and Point Sources. *AP 42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary and Point Sources*, 1–10. <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/c00s00.pdf%0Ahttps://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/c00s00.pdf>

Yassi, A., Kjellström, T., de Kok, T., & Guidotti, T. L. (2002). SALUD AMBIENTAL BÁSICA.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente - ORGANIZACIÓN MUNDIAL
DE LA SALUD. México D.F.